DOI: 10.20103/j.stxb.202312242806

吴亚彪,高晓东,何娜娜,葛东,于流洋,张利.黄土高原极端降水对人工林地深层土壤水分的补给效应.生态学报,2024,44(23):10757-10769. Wu Y B, Gao X D, He N N, Ge D, Yu L Y, Zhang L.Recharge effect of extreme precipitation on deep soil water in artificial forest on the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica,2024,44(23):10757-10769.

黄土高原极端降水对人工林地深层土壤水分的补给效应

吴亚彪1,高晓东2,3,*,何娜娜1,葛 东1,于流洋2,张 利1

- 1 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100
- 2 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100
- 3 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院, 杨凌 712100

摘要:深层土壤干燥化严重制约了黄土高原深根系植被的持续发展。然而,频发的极端降水事件能否缓解深层土壤水分亏缺仍尚不明晰。采用文献调研和实地重采样相结合的方法探究 2021 年黄土高原极端降水事件对典型人工林地(苹果和刺槐)深层土壤水分亏缺的影响。结果表明:(1)2021 年长武(累积极端降水量 524.5 mm)和洛川(累积极端降水量 467.4 mm)地区极端降水能完全恢复 2.2—6.8 m 的土壤干层,最低干燥化指数从 29.1%恢复到 147%。(2)长武 14 龄、19 龄和 24 龄苹果园的补给深度均达到 10 m,降水补给量分别为 777.7 mm、1513.1 mm 和 1301.4 mm;洛川 19 龄和 29 龄苹果园的补给深度为 6 m 和10 m,降水补给量为 388.4 mm 和 459.9 mm。由于极端降水贡献率高,平水年的庆阳地区 16 龄苹果园补给深度也达到 10 m,补给量为619.7 mm。(3)米脂和子长地区人工林地面临严重的土壤干燥化问题,1—10 m 垂直剖面分布深厚的土壤干层,其平均土壤含水量已低于6.5%。综上,极端降水有补给深层土壤水分的潜力,而缓解土壤干燥化的能力与极端降水量有关。研究结果为极端天气频发背景下黄土高原不同地区人工林的发展趋势提供理论依据。

关键词:黄土高原;人工林;极端降水;土壤干燥化;深层土壤水补

Recharge effect of extreme precipitation on deep soil water in artificial forest on the Loess Plateau

WU Yabiao¹, GAO Xiaodong^{2,3,*}, HE Nana¹, GE Dong¹, YU Liuyang², ZHANG Li¹

- 1 College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China
- 2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China
- 3 College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

Abstract: Severe deep soil desiccation seriously constrains the sustainable development of deep root vegetation on the Loess Plateau. However, it remains unclear whether frequently extreme precipitation events can alleviate the deficit of deep soil moisture. This study employed a combination of literature review and field resampling to investigate the impact of extreme precipitation events in 2021 on deep soil moisture deficits in typical artificial forest areas (apple and locust) on the Loess Plateau. The results indicated that: (1) In 2021, the extreme precipitation in Changwu (cumulative extreme precipitation of 524.5 mm) and Luochuan (cumulative extreme precipitation of 467.4 mm) could completely restore the soil dry layer of 2.2—6.8 m, with the lowest desiccation index recovering from 29.1% to 147%. (2) In the 14-year-old, 19-year-old, and 24-year-old apple orchards in Changwu, the recharge depth reached 10 m, with precipitation recharge amounts of

基金项目:国家重点研发计划(2021YFD1900700);陕西省自然科学基础研究计划(2021JC-19);唐仲英基金

收稿日期:2023-12-24; 网络出版日期:2024-08-29

^{*}通讯作者 Corresponding author.E-mail: gao_xiaodong@nwafu.edu.cn

777.7 mm, 1513.1 mm, and 1301.4 mm, respectively. In the 19-year-old and 29-year-old apple orchards in Luochuan, the recharge depths were 6 meters and 10 meters, with precipitation recharge amounts of 388.4 mm and 459.9 mm, respectively. Due to the high contribution rate of extreme precipitation, even in normal water years, the 16-year-old apple orchard in Qingyang had a recharge depth of 10 meters, with a precipitation recharge amount of 619.7 mm. (3) Artificial forest land in Mizhi and Zichang areas was facing serious soil desiccation problems, resulting in a deep soil desiccation layer in the 1—10 meter vertical profile, with an average soil moisture content of less than 6.5%. In conclusion, extreme precipitation has the potential to recharge deep soil water, and the ability to alleviate soil desiccation is related to extreme precipitation. The research results provide a theoretical basis for the development trend of plantation in different areas of the Loess Plateau under the background of frequent extreme weather.

Key Words: the Loess Plateau; artificial forest; extreme precipitation; soil desiccation; deep soil water recharge

自 1999 年实施"退耕还林(草)"工程以来,黄土高原的植被覆盖度已上升超过 25%^[1],有效控制了该区的水土流失并改善了生态环境^[2-3]。虽然引入的外来树种可以提供较高的生态价值^[4],但通常比本地植物消耗更多土壤水分,加剧了水资源供需矛盾^[5]。由于黄土高原气候干旱,多年潜在蒸散量远高于降水量^[6-7],人工林往往通过发展深根系吸收利用深层土壤水分以满足蒸散需求^[8]。大面积人工林过度消耗深层土壤水分引发了深层土壤干燥化^[9]和"小老头树"等一系列的生态水文问题^[10-11]。因此,黄土高原人工林的土壤干燥化问题受到很多学者关注,已在干燥土层的定义^[12]、区域时空分布类型^[13-14]、量化描述方法^[15]、形成原因^[16-17]、影响因素^[18-19]及水分恢复与调控^[20-21]等方面取得了重要进展。但鲜有研究探究黄土高原极端降水事件对深根系人工林土壤干层的补给效应,并且缺乏精确量化极端降水对深层土壤水分补给深度和补给量的研究。

在全球气候变暖背景下,大气中温室气体含量增加,使得大气中的水蒸气含量大幅增加,进而导致降水格局存在非常大的不确定性^[22]。近些年来,我国极端降水事件的频率和强度呈上升趋势,自退耕还林(草)实施以来,黄土高原极端气候水文事件(暴雨、干旱)不仅呈现出极端降水强度增加的趋势^[23];而且与1980—2000年相比,极端降水事件发生的频率也明显上升^[24]。随着降水强度的增加,极端降水可能会以"优先流"的形式迅速补给深层土壤水分,降水入渗深度增加,土壤蓄水量也有所增加^[25]。植被恢复所种植的人工林和灌草会提高土壤入渗能力和蓄水能力^[26—27],为极端降水补给人工林深层土壤水分提供契机。同时,半干旱地区的减雨试验表明降水量减少会加剧人工林深层土壤干燥程度^[28]。由于黄土高原极端降水时空分布差异性,湿润年及干旱年等不同情境下人工林深层土壤干燥化对极端降水增加如何响应值得探讨。探究极端降水事件对深层土壤干燥化的影响对明晰未来气候变化下黄土高原人工林可持续恢复和健康发展均具有重要指导意义。

黄土高原 2021 年降水事件较为特殊,东南地区为极端丰水年,极端降水频率增加,而西北地区则为极端干旱年,极端降水频率减少。因此本研究以 2021 年黄土高原极端降水事件为例,通过文献整合,收集采样时间介于 2018—2020 年之间的研究中,来自 428—623 mm 降水梯度下共 7 个采样点的土壤水分数据;其次,于 2022 年 4—7 月份对 7 个采样点进行重采样,以获得 2022 年的土壤水分数据。旨在(1)分析黄土高原不同降水梯度带下 2021 年极端降水前后人工林土壤干燥化特征值的差异;(2) 探讨极端降水对人工林深层土壤水分的补给效应。以期提高对未来气候多变背景下黄土高原植被恢复可持续性的客观认识,并为科学经营人工林提供参考。

1 材料与方法

1.1 文献数据整合

分别在中国知网(https://www.cnki.net/)和 Web of science 数据库(https://webofscience.clarivate.cn/)及

Google Scholar 数据库(http://scholar.google.com/)检索"黄土高原或黄土丘陵区(Loess plateau or Loess hilly region)","人工林或造林(artificial forest or afforestation)","土壤湿度或土壤含水量(soil moisture or soil water content)","土壤水分亏缺度(soil water deficit)或土壤干燥化(soil desiccation)"等关键词,基于此收集有关黄土高原不同气候区人工林(苹果或刺槐)土壤水分的文献。依据本文的分析目的,具体筛选标准为:(1)深根系人工林土壤水分采样深度≥800 cm 的数据,并且采样间隔≤100 cm,以探究深层土壤水分的空间分布动态;(2)土壤水分为质量含水量或体积含水量,如果是体积含水量,则依据当地平均土壤容重,将其统一转化为质量含水量;(3)排除了仅涉及灌木和草本群落或采用灌溉、覆盖、修剪等措施的试验;(4)明确给出研究地点、人工林树龄、栽植密度、气候条件(多年平均降水量)等数据;(5)为尽量缩小首次采样与重采样期间其他年份极端降水和人工林生长状况等因素引起的土壤水分差异,同时,为保证一定的论文数量,选择采样时间介于2018—2020年之间的文献。最终,统筹考虑上述筛选标准及2021年极端降水分布情况,总共获得5篇文献(具体信息如表1所示)。然后,使用 Get Data Graph Digitizer 提取文献中符合标准的水分数据。

1.2 野外重采样试验

1.2.1 研究区

以黄土高原(34°43′—41°16′ N,100°54′—114°33′ E)为研究区,该区域属于半干旱性大陆气候,自西北向东南,年均温变化在8—14℃,日均温度10℃以上。主要土壤类型为黄土,深度为50—300 m。年平均降水量从北部的200 mm 到西南部的800 mm 不等。降水年际变化大,季节分配不均,其中65%以上集中于7—9月份^[29]。基于文献整合数据(表1),选择了长武县、洛川县、庆城县、延安市、大宁县、子长县和米脂县等7个分布在不同降水梯度的代表性样地作为本次重采样的研究区(图1)。经实地考察,人工林地均位于平坦的塬面,两次采样时间内,各样点人工林均保持清耕,无灌溉。

Table 1 Basic sampling information of integrated analysis data on the Loess Plateau 采样树种 采样树龄 采样深度 文献来源 采样地点 采样时间 纬度(N) 经度(E) Sampling Sampling Sampling Literature Sample site Sampling date Longitude Latitude depth/m species tree age/a sources 107°41′ 苹果 长武县 2018 35°14′ 5,10,15,20,24 23 [30] 长武县 2017-2019 107°41' 35°22′ 苹果 9,12,16,19,23 19 [31] 延安市 2018 109°20′ 36°22′ 苹果;刺槐 15;16 16 [32] 苹果;刺槐 延安市 2019 109°21' 36°41' 10 [33] 15;15 苹果 23 洛川县 2018 109°26′ 35°43′ 5,10,15,25 [30] 米脂县 2019 110°12′ 37°46′ 苹果;刺槐 15;15 10 [33] 10 子长市 2019 109°26′ 37°14′ 苹果;刺槐 13;14 [33] 庆城县 2018 107°57′ 35°59′ 苹果 6,12,22,32 23 [30] 苹果;桃树 大宁县 2018 110°58′ 36°52′ [34] 8,25;12 15 - 20

表 1 黄土高原整合分析数据的采样基础信息

1.2.2 数据采集

基于选取文献的坐标信息选择重采样位置,同时与各文献作者进行确定,保证本次试验采样位置与前人采样位置的水平距离小于 50 m,从而排除地质及地形差异引起对比试验的偏差。采集土样前清理植被下的杂草和树叶等覆盖物,采样点与树干的距离与原试验保持一致。使用内径为 6 cm 的手动螺旋钻以 20 cm 为间隔采集 10 m 剖面上的土样,每个采样点取 3 个重复。将采集的土样装进铝盒中带回实验室,采用烘干法测定土壤质量含水量。另外,用环刀采集原状土壤样品,带回实验室,用环刀法测定土壤容重和田间持水量。由于土壤质地的时空变异较小,不同样地的凋萎含水量均获取自文献资料,为了统一计算,对土壤剖面上有多个凋萎含水量的数据取均值后参与本研究的计算。同时,采集每个采样点的基础信息,以及各树种人工林的胸径、基径和冠幅。此外,通过对文献资料记载的树龄与两次采样年的间隔时段相加的方法,确定人工林的树龄。气象数据从与采样点水平距离< 1000 m 的小型气象站获取。

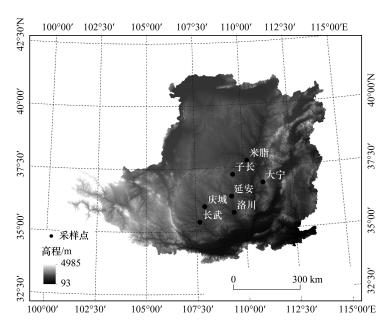


图 1 黄土高原重采样点分布图

Fig.1 Distribution of resampling points on the Loess Plateau

1.3 评价指标

1.3.1 极端降水阈值

参考前人[35-36]的研究.本文将极端降水事件定义为超过有效日降水量(≥0.1 mm)第95个百分位数的 事件。具体计算方法为:将各地气象站 1980—2020 年日降水量≥0.1 mm 的降水量升序排列,将第 95 个百分 位的值定义为该地区的极端降水阈值,当该站某日降水量大于该阈值,就认为该站出现极端降水事件[37]。此 外,将极端降水贡献率定义为累积极端降水量与年降水总量的比值。

1.3.2 土壤干燥指数

土壤干燥指数可以评估区域内的水分亏缺情况,由下式计算:

$$SDI = \frac{SWC - SWC_{min}}{SFC - SWC_{min}} \times 100\%$$
 (1)

式中,SDI 为干燥指数;SFC 为稳定田间持水量,值为田间持水量的 60%;SWC 为土壤含水量(%);SWC nin 为凋 萎含水量(%)。根据 SDI 值将土壤干燥化强度划分为以下 6 个等级, SDI≥100%为无土壤干燥化现象, 75% 强烈干燥化,SDI<0%极度干燥化。

本研究采用土壤干层厚度(DSLT)、土壤干层形成深度(DSLFD)和土壤干层平均含水量(DSL-SWC)来量 化土壤干层[38]。土壤干层研究剔除 0—1 m 浅层土壤。

$$DSLT = d_i \times \sum_{i=1}^{n} S(SWC_i - SFC)$$
 (2)

DSLFD =
$$20 \times k$$
, k 取决于 $\sum_{i=1}^{k} S(SWC_i - SFC)$ (3)

DSL - SWC =
$$\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^{n} SWC_{i}$$
, (SWC_i-SFC<<0, i=6,7,8,...,N) (5)

式中,N 为土层深度数,n 为土壤干层中的土壤样品数(n < N),k 为土壤干层出现的土层深度数。

1.3.3 土壤储水量

$$SWS = \sum_{i=1}^{N} 0.1 \times \theta_m \times BD_i \times d_i$$
 (6)

式中,SWS 为本次重采样的土壤储水量(mm); θ_m 为测得的该层土壤质量含水量(%); BD_i 为该层土壤容重(g/cm^3); d_i 为土层厚度(cm^3)。

1.3.4 极端降水补给深度

本研究认为重采样土壤水分持续大于提取的土壤水分直至两者相同时的深度为降水补给深度。

$$H = 20 \times h, h$$
 取决于
$$\begin{cases} SWC_{h-2} - SWC_{dh-2} > 0 \\ and \\ SWC_{h} - SWC_{dh} < < 0 \end{cases}$$
 (7)

式中,H 为各采样点的降水补给深度(cm),h 为降水补给深度数, SWC_h 为 h 深度的重采样土壤含水量(%), SWC_h 为 h 深度的原采样土壤含水量(%)。

1.3.5 土壤储水量的变化量

降水补给量为降水补给深度内重采样与原采样两个时段内土壤储水量的增值。

$$\Delta S = SWS - SWS_d \tag{8}$$

式中, ΔS 为重采样与原采样两个时段土壤储水量的变化量(mm); SWS_a 为原采样的土壤储水量(mm)。

1.4 数据分析

本文的数据整理与统计处理分析主要在 Microsoft Excel 2016;采用 SPSS 22.0 软件包中的单因素方差分析对降雨前后土壤干燥指数的差异显著性进行分析;采用 AreGIS 10.2 软件和 Origin 2016 软件进行绘图处理。

2 结果

2.1 2021 年不同降水梯度下极端降水特征

依据 2021 年降水量(表 2)和降水频率曲线(图 2),可将长武、洛川和大宁划分为极端湿润年,2021 年降

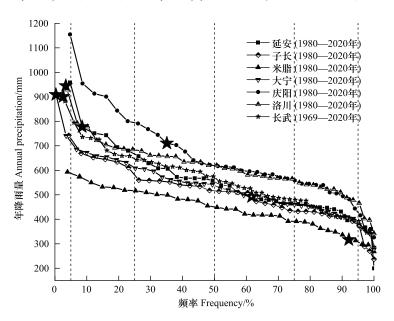


图 2 黄土高原采样点的降水频率曲线

Fig.2 Precipitation frequency curve of sampling points in the Loess Plateau

0—5%极端湿润年;5%—25%湿润年;25%—75%平水年;75%—95%干旱年;95%—100%极端干旱年;★为2021年降水量

水量分别为 900.4 mm、944.8 mm 和 908.5 mm,多年平均降水量分别为 607.5 mm、613.8 mm、517.6 mm;延安为湿润年,2021 年降水量为 777.7 mm,多年平均降水量为 547.7 mm;子长和庆阳为平水年,2021 年降水量为 491.9 mm 和 710.2 mm,多年平均降水量别为 490.3 mm 和 623.3 mm;米脂为干旱年,2021 年降水量为 316.2 mm,多年平均降水量为 427.5 mm。

依据 1.3.1 节所提计算极端降水阈值的方法,计算各采样点 2021 年的极端降水阈值,计算结果见表 2。样点分布于半湿润区和半湿润半干旱区,多年平均降水量范围为 427.5—623 mm,极端降水阈值区间为20.5—25.4 mm。2021 年黄土高原的降水量在空间尺度差异较大,样点间年降水量范围为 316.2—944.8 mm,累积极端降水量范围为 245.7—798.9 mm。长武、洛川、延安和大宁地区累积极端降水量超过 400 mm,分别为524.5 mm、467.3 mm、442.7 mm 和 487.8 mm。除子长和米脂地区外,各样点 2021 年的累积极端降水量和极端降水贡献率在近几年中最高。2021 年样点间不同的极端降水条件便于研究极端降水缓解黄土高原土壤水分亏缺的能力。

表 2 黄土高原各采样点不同年份的降水格局

| Table 2 Precipitation pattern in different years at each sampling point on the Loess Plateau |
|--|
|--|

| 地区 Area | 年份 Year | 极端降水阈值 Extreme precipitation threshold/mm | 累积极端降水量 Cumulative extreme precipitation/mm | 年降水量 Precipitation/mm | 多年平均降水量 Mean annual precipitation/mm | 极端降水贡献率 Contribution rate of extreme precipitation/% |
|------------|------------|---|---|--------------------------|--|---|
| 长武 | 2018 | 20.5 | 346.6 | 715.2 | 607.5 | 48.5 |
| 长武 | 2019 | 20.5 | 442.6 | 778.3 | 607.5 | 56.9 |
| 长武 | 2020 | 20.5 | 171.8 | 585.2 | 607.5 | 29.4 |
| 长武 | 2021 | 20.5 | 524.5 | 900.4 | 607.5 | 58.3 |
| 延安 | 2018 | 25.3 | 251.6 | 564.0 | 547.7 | 44.6 |
| 延安 | 2019 | 25.3 | 244.3 | 497.6 | 547.7 | 49.1 |
| 延安 | 2020 | 25.3 | 157.3 | 535.7 | 547.7 | 29.4 |
| 延安 | 2021 | 25.3 | 442.7 | 777.7 | 547.7 | 56.9 |
| 洛川 | 2018 | 25.4 | 214.3 | 580.3 | 613.8 | 36.9 |
| 洛川 | 2019 | 25.4 | 242.4 | 596.6 | 613.8 | 40.6 |
| 洛川 | 2020 | 25.4 | 243.0 | 656.3 | 613.8 | 37.0 |
| 洛川 | 2021 | 25.4 | 467.3 | 944.8 | 613.8 | 49.5 |
| 子长 | 2019 | 25.0 | 113.2 | 400.5 | 490.3 | 28.3 |
| 子长 | 2020 | 25.0 | 160.9 | 502.6 | 490.3 | 32.0 |
| 子长 | 2021 | 25.0 | 198.9 | 491.9 | 490.3 | 40.4 |
| 米脂 | 2019 | 23.4 | 191.3 | 389.1 | 427.5 | 49.2 |
| 米脂 | 2020 | 23.4 | 126.0 | 418.8 | 427.5 | 30.1 |
| 米脂 | 2021 | 23.4 | 70.9 | 316.2 | 427.5 | 22.4 |
| 大宁 | 2018 | 24.9 | 131.7 | 498.2 | 517.6 | 26.4 |
| 大宁 | 2019 | 24.9 | 162.5 | 477.7 | 517.6 | 34.0 |
| 大宁 | 2020 | 24.9 | 307.0 | 740.9 | 517.6 | 41.4 |
| 大宁 | 2021 | 24.9 | 487.8 | 908.5 | 517.6 | 53.7 |
| 庆阳 | 2018 | 23.8 | 363.2 | 900.9 | 623.3 | 40.3 |
| 庆阳 | 2019 | 23.8 | 260.1 | 768.0 | 623.3 | 33.9 |
| 庆阳 | 2020 | 23.8 | 168.4 | 583.4 | 623.3 | 28.9 |
| 庆阳 | 2021 | 23.8 | 318.3 | 710.2 | 623.3 | 44.8 |

2.2 不同降水梯度下极端降水前后土壤干燥化特征

由表 3 可知,人工林生长加剧了黄土高原地区的土壤水分亏缺问题。在降水条件不同的 7 个采样地区中,农地(草地)没有出现土壤干层,而种植苹果和刺槐后,各地区人工林出现了不同程度的土壤干燥化现象,

并且干燥化程度随着人工林树龄增长而持续加剧。除长武外,大面积生长的刺槐及苹果等人工林地土壤干层分布深度已经达到 10 m。

表 3 极端降水前后黄土高原土壤干燥化特征

Table 3 Characteristics of soil desiccation in the Loess Plateau before and after extreme precipitation

| 采样点 Sample Site | 采样时间 Sampling date | 采样树种 Sampling species | 采样树龄 Sampling tree age/a | 土壤干层 形成深度 DSLFD/cm | 土壤干层 厚度 DSLT/cm | 土壤干层平 均含水量 DSL-SWC/% | 0—10 m 土壤 含水量均值 Average- SWC/% | 0—10 m 土壤 干燥指数均值 Average- SDI/% |
|--------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------|-----------------------|----------------------------|---|--|
| 长武 | 2018 | 农地 | 无 | | | | 17.8±1.3 a | 197.2 |
| 长武 | 2018 | 苹果 | 10 | | | | 16.6±1.8 a | 176.4 |
| 长武 | 2018 | 苹果 | 15 | 340 | 660 | 9.0 | $11.4 \pm 3.7 \text{ b}$ | 49.0 |
| 长武 | 2018 | 苹果 | 20 | 280 | 720 | 8.0 | $10.7 \pm 4.8 \; \mathrm{b}$ | 29.1 |
| 长武 | 2022 | 农地 | 无 | | | | 21.9±2 a | 297.3 |
| 长武 | 2022 | 苹果 | 14 | | | | 22.1±1.9 a | 300.9 |
| 长武 | 2022 | 苹果 | 19 | | | | 21.5±2.1 a | 290.3 |
| 长武 | 2022 | 苹果 | 24 | | | | $18.9\pm4~\mathrm{b}$ | 237.1 |
| 洛川 | 2018 | 农地 | 无 | | | | 18.8±2.3 a | 236.3 |
| 洛川 | 2018 | 苹果 | 15 | 220 | 680 | 12.0 | $13.2 \pm 2.6 \text{ b}$ | 95.7 |
| 洛川 | 2018 | 苹果 | 25 | 420 | 580 | 11.2 | $13.3 \pm 3.1 \text{ b}$ | 99.9 |
| 洛川 | 2022 | 农地 | 无 | | | | 20.7±2.5 a | 236.3 |
| 洛川 | 2022 | 苹果 | 19 | 580 | 340 | 11.5 | 14.6±3.6 c | 147.0 |
| 洛川 | 2022 | 苹果 | 29 | 780 | 220 | 12.4 | $15.9 \pm 3.1 \text{ b}$ | 263.2 |
| 大宁 | 2018 | 农地 | 无 | | | | 14.4±2.1 a | 169.0 |
| 大宁 | 2018 | 苹果 | 8 | 320 | 40 | 9.8 | $12.9 \pm 2.6 \text{ b}$ | 112.1 |
| 大宁 | 2018 | 苹果 | 25 | 180 | 820 | 8.1 | 8.7±1.7 c | 3.8 |
| 大宁 | 2022 | 农地 | 无 | | | | 12.6±1.4 a | 121.3 |
| 大宁 | 2022 | 苹果 | 12 | 560 | 140 | 9.8 | $10.6 \pm 1.5 \text{ b}$ | 72.4 |
| 大宁 | 2022 | 苹果 | 29 | 600 | 400 | 8.9 | 11.2±2.7 b | 84.6 |
| 延安 | 2019 | 草地 | 无 | | | | 18.0±2.8 a | 204.1 |
| 延安 | 2018 | 苹果 | 15 | | | | 16.6±1.4 b | 188.8 |
| 延安 | 2018 | 刺槐 | 16 | 100 | 740 | 10.7 | 11.5±2.4 c | 71.9 |
| 延安 | 2019 | 刺槐 | 15 | 140 | 700 | 10.5 | 12.5±3.4 c | 44.9 |
| 延安 | 2022 | 草地 | 无 | | | | 16.8±2 a | 201.4 |
| 延安 | 2022 | 苹果 | 19 | 540 | 460 | 10.9 | 11.8±2 b | 86.8 |
| 延安 | 2022 | 刺槐 | 20 | 320 | 680 | 8.4 | 10.7±3.8 c | 44.4 |
| 延安 | 2022 | 刺槐 | 18 | 360 | 640 | 9.7 | 10.6±1.8 c | 49.0 |
| 庆阳 | 2018 | 农地 | 无 | | | | 17.3±1.7 a | 181.2 |
| 庆阳 | 2018 | 苹果 | 12 | 180 | 460 | 11.0 | 12.6±1.9 b | 90.6 |
| 庆阳 | 2018 | 苹果 | 32 | 220 | 780 | 10.0 | 11.4±2.8 c | 65.4 |
| 庆阳 | 2022 | 农地 | 无 | | | | 16.2±3 a | 167.8 |
| 庆阳 | 2022 | 苹果 | 16 | | | | 16.4±2.8 a | 172.6 |
| 庆阳 | 2022 | 苹果 | 36 | 380 | 620 | 10.1 | 10.9±2.2 b | 63.9 |
| 子长 | 2019 | 苹果 | 13 | 100 | 900 | 5.6 | 6.2±2.2 | 28.9 |
| 子长 | 2019 | 刺槐 | 14 | 100 | 900 | 2.0 | 3.2±2.9 | -35.8 |
| 子长 | 2022 | 苹果 | 16 | 100 | 900 | 5.8 | 5.8±2 | 27.5 |
| 子长 | 2022 | 刺槐 | 17 | 100 | 900 | 4.0 | 3.9±4.7 | -30.9 |
| 米脂 | 2019 | 农地 | 无 | | | | 18.0±2.8 a | 240.5 |
| 米脂 | 2019 | 苹果 | 15 | | | | 14.8±3.3 c | 174.8 |
| 米脂 | 2019 | 刺槐 | 15 | | | | 12.5±3.4 b | 133.5 |
| 米脂 | 2022 | 农地 | 无 | | | | 12.2±2.3 a | 148.9 |
| 米脂 | 2022 | 苹果 | 18 | 100 | 900 | 6.1 | 6.1±1.2 b | 36.2 |
| 米脂 | 2022 | 刺槐 | 18 | 100 | 900 | 4.2 | 4.2±0.7 c | 3.6 |

采样树龄为每次采样时同一片人工林的实际树龄;不同小写字母表示重采样及原采样中不同树龄土壤水分差异显著性(P<0.05)

受 2021 年降水条件的影响,人工林的土壤干燥化特征与前人研究时发生变化。极端湿润年的长武、洛川和大宁地区深层土壤水分均得到不同程度的补给:长武地区 14、19 和 24 龄苹果园的土壤干层消失,苹果园和农地均处于无干燥化状态;洛川地区 2—6 m 深度的土壤干层消失,苹果园和农地转化为无干燥化状态;而大宁地区 12 龄苹果园和 29 龄苹果园土壤干层形成深度下降至 5.6 m 和 6 m, 29 龄苹果园干燥化程度有所缓解,为轻度干燥化。湿润年的延安地区,降水难以缓解深层土壤水分亏缺问题,土壤干层形成深度下降至 3.2 m,刺槐林均处于严重干燥化平水年的庆阳地区,16 龄苹果园 4.6 m 厚度的土壤干层被降水补给消除,36 龄苹果园浅层土壤水分也得到补给,土壤干层形成深度下降至 3.8 m。平水年的子长地区和干旱年的米脂地区土壤干燥化问题未得到极端降水缓解,2022 年时两地区均面临严重的土壤干燥化问题。子长地区依然在 1—10 m 深度分布土壤干层,土壤干燥化严重;米脂地区土壤水分被植被大量消耗,苹果园和刺槐林在 1—10 m 剖面新增土壤干层,剖面内平均土壤含水量仅为 6.1%和 4.2%,分别处于严重干燥化和强烈干燥化状态。

2.3 极端降水对不同气候区土壤干燥化的恢复程度

2.3.1 极端降水对土壤水分的补给深度

通过图 3 可以发现极端降水具有补给深层土壤水分的能力,补给效果与极端降水量有关。极端湿润年的长武和洛川地区充分体现了极端降水补给深层土壤水分的能力,长武地区 14、19 和 24 树龄苹果的降水补给深度均达到 10 m,洛川地区 19 龄和 29 龄苹果的补给深度分别为 6 m 和 10 m。而同为极端湿润年的大宁地区 12 龄和 29 龄苹果的补给深度分别为 5.4 m 和 7.2 m。湿润年的延安地区 19 龄和 20 龄刺槐的补给深度分别为 4.2 m 和 3.4 m。极端降水贡献率高的平水年也具有补给深层土壤水分的潜力,比如庆阳地区 16 龄和 36 龄苹果的补给深度分别为 10 m 和 4.4 m;子长地区 16 龄苹果和 17 龄刺槐的补给深度分别为 4.4 m 和 10 m。干旱年米脂地区,极端降水量最少,仅为 70.9 mm,人工林深层土壤水分仍然处于被消耗状态。

2.3.2 极端降水对土壤水分的补给量

图 3 表明土壤储水量受各地降水条件和植被类型影响,极端降水缓解人工林深层土壤水分亏缺具有很大潜力。长武地区 14 龄、19 龄和 24 龄苹果的补给量分别为 777.7 mm、1513.1 mm 和 1301.4 mm;洛川地区19 龄和 29 龄苹果的补给量分别为 388.4 mm 和 459.9 mm;庆阳地区 16 龄和 36 龄苹果的补给量分别为 619.7 mm和 25.3 mm;大宁 12 龄和 29 龄苹果的补给量分别为 44.6 mm和 394.9 mm;延安地区 19 龄和 20 龄刺槐补给量分别为 70.2 mm和 174.0 mm;子长地区 16 龄苹果和 17 龄刺槐的补给量分别为 65.2 mm和 178.9 mm。苹果园中1—10 m深度土层土壤储水量最多的地区为长武,其次为洛川、庆阳和大宁;刺槐林中1—10 m深度土层土壤储水量最多的地区为长武,其次为洛川、庆阳和大宁;刺槐林中1—10 m深度土层土壤储水量最多的地区为长武,其次为洛川、庆阳和大宁;刺槐林中1—10 m深度土层土壤储水量最多的地区是延安,其次是米脂和子长。

人工林生长发育需要消耗大量土壤水分,除长武地区人工林土壤水分大量恢复外,洛川、延安和大宁等其他地区农地(草地)土壤储水量显著高于人工林(P<0.05)。2022 年农地(草地)1—10 m 土层储水量中长武(2974.8 mm)>洛川(2821.2 mm)>延安(2292.0 mm)>庆阳(2178.8 mm)>大宁(1725.0 mm)>米脂(1649.4 mm)。长武、洛川、和延安农地(草地)1—10 m 土层土壤储水量分别增加了608.4 mm、342.4 mm 和58.6 mm;大宁、庆阳和米脂农地土壤储水量分别减少了242.9 mm、99.0 mm 和16.5 mm。

3 讨论

黄土高原年降雨量少且地下水埋藏较深,因此,深层土壤水分作为稳定的水源,被深根系人工林大量消耗而处于严重亏缺状态^[39]。极端降水可以降低半干旱生态系统中的蒸发损失,从而促进水分向深层土壤中入渗^[40]。人为因素引起的气候变暖增加了极端天气事件的频度和强度,Du 等人^[41]研究发现,亚洲地区极端天气导致降水正在增加。2021年黄土高原的降水分布呈现显著的空间变异,其中长武、洛川和大宁为极端湿润年,延安为湿润年,庆阳和子长为平水年,米脂为干旱年(表 2 和图 2)。充足的极端降雨量为该区域人工林深层土壤干层的恢复提供有效契机。

降水量可有效促进极端降水补给深层土壤水分的效果。研究结果表明,在半干旱区的米脂和子长,降水

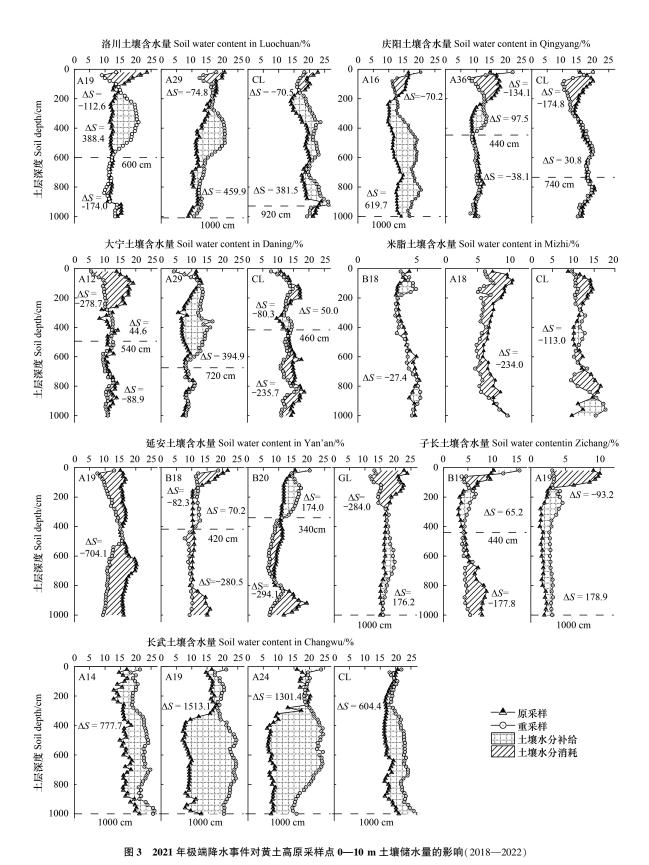


Fig.3 Effects of extreme precipitation events in 2021 on soil water storage at 0—10 m sampling sites in the Loess Plateau (2018-2022) 苹果(A);刺槐(B);农地(CL);草地(GL); ΔS 为重采样与原采样两个时段土壤储水量的变化量(mm)

不足以补给因刺槐和苹果等人工林生长消耗的土壤水分,土壤干层分布于整个剖面,水分严重亏缺。而长武、 洛川和庆阳累积极端降水量分别达到 524.5 mm、467.3 mm 和 318.3 mm,均对人工林地的深层土壤水分产生 明显的补给效果,值得注意的是,三个地区的最大有效补给深度均达到 10 m。而 Liu 等人[42]研究表明,即使 是极端湿润年,降水对农地的补给深度只到 5 m。本研究结果与这一结论不同,可归因于:成熟人工林根系发 达并且一部分根系老化凋落,形成了生物大孔隙,从而改善了土壤结构,有利于降水入渗。此外,在极端湿润 年发生极端降水后,降水补给土壤水分过程从"活塞流"转变为"活塞流"和"优先流"方式[43],土壤水分将重 力势能化为动能,通过土壤中的大孔隙,例如裂缝和生物孔隙等快速向下运移[4]。另外,这同样是庆阳、洛川 和大宁等地人工林地的降水补给深度超过同区域草地的原因。人工林地存在的深厚干层在一定程度上会阻 碍降水向深层土壤入渗,延安人工林地的恢复深度低于草地,这主要归因于,1-10 m 分布的深厚土壤干层会 抑制深层土壤和浅层土壤之间的水分交换[45],进而阻碍降水向深层土壤中人渗;另一方面,降水量少于长武 等地。此外,长武果园的降水补给量超过2021年降水量(900.4 mm)。因此,本文所得各样点的降水补给量 反映了近几年的降水累积补给情况。从表 2 可以看出,除了长武地区,其他地区在 2018—2020 年间的累积极 端降水量明显低于2021年。这说明各地区的降水补给效果主要反映了2021年的极端降水对土壤水分的补 给。长武果园在 2019 年经历了极端湿润年,累积极端降水量超过 400 mm,对果园剖面中的土壤水分进行了 补给。其次,在2020年,果树受到霜冻的影响,导致果树枝叶生长和产量下降,从而减少了果树对土壤水分的 消耗量[46]。因此,采样间隔中入渗增加且消耗量减少交互作用,使得长武果园中土壤储水的增加量超过2021 年的降水量。

不同林龄的人工林对土壤水分的消耗程度存在差异^[47],人工林对土壤水分的消耗速度影响极端降水对土壤干层的恢复效果。研究结果表明,在累积极端降水量超过 400 mm 的洛川和大宁均呈现大龄苹果园降水对土壤水分补给量和补给深度均高于中龄苹果园的现象。费洪岩等^[48]发现刺槐在 10 龄时处于生长旺盛时期,此时土壤水分消耗速率最快,40 龄刺槐植株老化,土壤水分消耗速率最慢。大龄人工林比中龄人工林消耗更少土壤水分是同一地区大龄果园补给量大于中龄果园的原因。由于根系分布差异,大龄果园的土壤孔隙结构更良好,从而导致土壤的非饱和导水率更高^[49],降水可以向深层入渗更多。

土壤干燥化进程与植被的生长年限紧密相关^[50],灌草生长旺盛期,增加的土壤水分需求导致土壤干燥化进程加快,与之相反,在生长衰退时期,土层干燥化深度会减小。与灌草不同,随着苹果树龄的增大,果园土壤水分呈减少的变化趋势,庆阳、大宁和洛川地区大龄苹果园土壤水分含量显著低于其他树龄(P<0.05),长武苹果园土壤水分含量也随树龄增加而减少。尽管大龄人工林对降水补给的响应效果优于其他树龄,但长期累积的土壤水分消耗仍未被近几年的降水补给所弥补。因此,大龄果园的土壤干燥化问题仍然最为严重(表3)。

气候变暖导致了长武和洛川等地区极端降水频度和强度增加,有利于恢复人工林的土壤干层。然而,除长武人工林土壤水分显著恢复外,其他地区人工林土壤含水量仍显著低于农地(草地)。此外,人工林的土壤干层分布深度达到 10 m。其中,由于当地的气候条件,米脂地区难以产生长武和洛川等地区的大量极端降水。事实上,该地区 2019—2021 年的降水量都低于多年平均降水量,导致了三年内人工林 1—10 m 剖面土壤干层的增加。因此,由于 2019—2021 年间降水量都低于多年平均值,加速了米脂地区人工林地土壤的干燥化进程。类似地,子长地区的人工林在 1—10 m 剖面仍然存在着深厚的土壤干层。而人工林深厚的土壤干层会破坏植物根系吸水平衡,限制土壤蓄水调控功能[1],因此,人工林对黄土高原生态系统带来的负面影响不容忽视。同时,在水分不足的情况下长期种植苹果树会加剧土壤储水不足,导致苹果生产力下降[51],土壤干层分布深度不断加深[23]。

各地土壤含水量的变化是当地近几年降水条件、植被消耗和其他各种因素共同影响的结果,也在一定程度上反映了未来土壤含水量的变化趋势。因此,可以认为在现有人工林种植密度和管理模式下,长武、洛川和庆阳地区能满足人工林的持续健康发展;延安地区土壤水分会持续减少,人工林的长期持续健康发展面临考

验;米脂和子长地区土壤水分难以增加,0—10 m 剖面的平均含水量已低于 6.5%,不能满足人工林的持续健康发展。综上,在未来气候背景下,我们应该加强对人工林的管理与维护,如通过优化种植结构、调整植被类型、增加土壤入渗、进行径流调控和抑制蒸腾等措施,降低人工林的高耗水性。特别是要关注大龄人工林面临的土壤干燥化问题,在米脂和子长等半干旱地区采取间伐等人为管理措施,以保证退耕还林(草)工程的健康可持续发展。

4 结论

- (1)极端降水具有恢复深层土壤水分的潜力,降水补给深度可达 10 m,而其缓解干燥化的能力与极端降水量有关。长武和洛川地区的极端降水对人工林深层土壤水分的补给能力最强,平均降水补给深度分别为 10 m 和 8.4 m。不同区域充足的极端降水将部分树龄人工林 0—10 m 剖面土壤含水量恢复至与农地相同的水平,包括长武地区 14 和 19 龄苹果园及庆阳地区 16 龄苹果园。
- (2)人工林对土壤水分的消耗速度影响到极端降水对土壤干层的恢复效果。大龄人工林由于对土壤水分的消耗较少表现出比其他树龄人工林更好的对降水补给的响应效果,但大龄人工林所面临的土壤干燥化问题仍最严重。
- (3)缺乏管理的人工林会打破黄土高原原有植被生长需水和降水补给的动态平衡,导致严重的土壤干燥化。除长武地区外,其他地区的人工林存在土壤干层。2022年,各地人工林0—10 m 剖面的平均含水量为:长武(21.0%)>洛川(15.3%)>庆阳(13.7%)>延安(11.0%)>大宁(10.9%)>米脂(5.2%)>子长(4.3%)。长武、洛川和庆阳地区能维持人工林的健康发展。然而,米脂和子长地区的土壤储水量因人工林生长发育消耗而显著低于其他地区,当地降水条件难以缓解土壤干燥化进程,因此,无法满足人工林的持续健康发展。

参考文献 (References):

- [1] Feng X M, Fu B J, Piao S L, Wang S, Ciais P, Zeng Z Z, Lü Y H, Zeng Y, Li Y, Jiang X H, Wu B F. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. Nature Climate Change, 2016, 6: 1019-1022.
- [2] Chen Y P, Wang K B, Lin Y S, Shi W Y, Song Y, He X H. Balancing green and grain trade. Nature Geoscience, 2015, 8: 739-741.
- [3] 刘国彬,上官周平,姚文艺,杨勤科,赵敏娟,党小虎,郭明航,王国梁,王兵.黄土高原生态工程的生态成效.中国科学院院刊,2017,32(1):11-19.
- [4] 熊瑛楠, 冯天骄, 王平, 吴旭东. 晋西黄土区长期人工林恢复对土壤水分和养分性质的影响. 水土保持学报, 2022, 36(2): 228-237+246.
- [5] Yang L, Chen L D, Wei W, Yu Y, Zhang H D. Comparison of deep soil moisture in two re-vegetation watersheds in semi-arid regions. Journal of Hydrology, 2014, 513: 314-321.
- [6] Chen L D, Wei W, Fu B J, Lü Y H. Soil and water conservation on the Loess Plateau in China; review and perspective. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 2007, 31(4): 389-403.
- [7] 邵明安, 贾小旭, 王云强, 朱元骏. 黄土高原土壤干层研究进展与展望. 地球科学进展, 2016, 31(1): 14-22.
- [8] Fan Y, Miguez-Macho G, Jobbágy E G, Jackson R B, Otero-Casal C. Hydrologic regulation of plant rooting depth. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2017, 114(40): 10572-10577.
- [9] Wang Y Q, Shao M A, Zhu Y J, Liu Z P. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(4): 437-448.
- [10] Huang T M, Pang Z H, Edmunds W M. Soil profile evolution following land-use change: implications for groundwater quantity and quality. Hydrological Processes, 2013, 27(8): 1238-1252.
- [11] Zhang Z Q, Li M, Si B C, Feng H. Deep rooted apple trees decrease groundwater recharge in the highland region of the Loess Plateau, China. The Science of the Total Environment, 2018, 622/623; 584-593.
- [12] 陈洪松, 王克林, 邵明安. 黄土区人工林草植被深层土壤干燥化研究进展. 林业科学, 2005, 41(4): 155-161.
- [13] 侯庆春, 韩蕊莲, 韩仕锋. 黄土高原人工林草地"土壤干层"问题初探. 中国水土保持, 1999, (5): 13-16.
- [14] 杨文治, 田均良. 黄土高原土壤干燥化问题探源. 土壤学报, 2004, 41(1): 1-6.
- [15] Wang Y Q, Shao M A, Zhu Y J, Sun H, Fang L C. A new index to quantify dried soil layers in water-limited ecosystems; a case study on the

- Chinese Loess Plateau. Geoderma, 2018, 322: 1-11.
- [16] 侯庆春,黄旭,韩仕峰,张孝忠.黄土高原地区小老树成因及其改造途径的研究——Ⅱ土壤水分和养分状况及其与小老树生长的关系.水土保持学报,1991,5(2):75-83.
- [17] 赵景波, 孙桂贞, 岳应利, 陈宝群. 关中平原人工林地的干层及其成因. 地理研究, 2007, 26(4): 763-772.
- [18] Liang H B, Meng Z L, Li Z S, Liu G H. The effect of *Robinia pseudoacacia* plantation on soil desiccation across different precipitation zones of the Loess Plateau, China. Forests, 2022, 13(2): 321.
- [19] Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P, Warrington D N. Regional spatial pattern of deep soil water content and its influencing factors. Hydrological Sciences Journal, 2012, 57(2): 265-281.
- [20] 王志强,刘宝元,路炳军,黄土高原半干旱区土壤干层水分恢复研究,牛态学报,2003,23(9):1944-1950.
- [21] Li Y S, Huang M B. Pasture yield and soil water depletion of continuous growing alfalfa in the Loess Plateau of China. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2008, 124(1/2): 24-32.
- [22] Gao X R, Zhao Q, Zhao X N, Wu P T, Pan W X, Gao X D, Sun M. Temporal and spatial evolution of the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in the Loess Plateau under climate change from 2001 to 2050. The Science of the Total Environment, 2017, 595: 191-200.
- [23] 杨维涛, 孙建国, 康永泰, 马恒利, 徐睿择. 黄土高原地区极端气候指数时空变化. 干旱区地理, 2020, 43(06): 1456-1466.
- [24] 卢珊, 胡泽勇, 付春伟, 樊威伟, 吴笛. 黄土高原夏季极端降水及其成因分析. 高原气象, 2022, 41(1): 241-254.
- [25] He Z M, Jia G D, Liu Z Q, Zhang Z Y, Yu X X, Xiao P Q. Field studies on the influence of rainfall intensity, vegetation cover and slope length on soil moisture infiltration on typical watersheds of the Loess Plateau, China. Hydrological Processes, 2020, 34(25): 4904-4919.
- [26] Gu C J, Mu X M, Gao P, Zhao G J, Sun W Y, Tatarko J, Tan X J. Influence of vegetation restoration on soil physical properties in the Loess Plateau, China. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(2): 716-728.
- [27] Wu G L, Yang Z, Cui Z, Liu Y, Fang N F, Shi Z H. Mixed artificial grasslands with more roots improved mine soil infiltration capacity. Journal of Hydrology, 2016, 535: 54-60.
- [28] Zhao L H, Gao X D, He N N, Zhao X N. Ecohydrological advantage of young apple tree-based agroforestry and its response to extreme droughts on the semiarid Loess Plateau. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 321; 108969.
- [29] Zhao G J, Zhai J Q, Tian P, Zhang L M, Mu X M, An Z F, Han M W. Variations in extreme precipitation on the Loess Plateau using a high-resolution dataset and their linkages with atmospheric circulation indices. Theoretical and Applied Climatology, 2018, 133(3): 1235-1247.
- [30] 王亚萍. 黄土塬区农田-果园镶嵌布局深剖面土壤水分时空分布及影响因素. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [31] Tao Z, Neil E, Si B C. Determining deep root water uptake patterns with tree age in the Chinese loess area. Agricultural Water Management, 2021, 249: 106810.
- [32] Wu W J, Li H J, Feng H, Si B C, Chen G J, Meng T F, Li Y, Siddique K H M. Precipitation dominates the transpiration of both the economic forest (Malus pumila) and ecological forest (Robinia pseudoacacia) on the Loess Plateau after about 15 years of water depletion in deep soil. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 297: 108244.
- [33] Wang S F, Yang M, Gao X D, Zhang Z B, Wang X, Zhao X Z, Wu P T. Comparison of the root-soil water relationship of two typical revegetation species along a precipitation gradient on the Loess Plateau. Environmental Research Letters, 2021, 16: 064054.
- [34] Shi P J, Huang Y, Yang C, Li Z. Quantitative estimation of groundwater recharge in the thick loess deposits using multiple environmental tracers and methods. Journal of Hydrology, 2021, 603(8): 126895.
- [35] Song X M, Zhang J Y, Zou X J, Zhang C H, AghaKouchak A, Kong F Z. Changes in precipitation extremes in the Beijing metropolitan area during 1960-2012. Atmospheric Research, 2019, 222: 134-153.
- [36] Li X, Zhang K, Bao H J, Zhang H D. Climatology and changes in hourly precipitation extremes over China during 1970-2018. The Science of the Total Environment, 2022, 839; 156297.
- [37] 陈红专. 湖南极端降水的气候特征及天气系统分型研究. 气象, 2021, 47(10): 1219-1232.
- [38] Liang X Y, Xin Z B, Shen H Y, Yan T F. Deep soil water deficit causes *Populus simonii* Carr degradation in the three north shelterbelt region of China. Journal of Hydrology, 2022, 612; 128201.
- [39] 王稳,高晓东,赵西宁,杨孟豪.黄土高原不同气候区刺槐林恢复年限对水、碳及植物多样性的影响.生态学报,2023,43(23):9770-9783.
- [40] Knapp A K, Beier C, Briske D D, Classen A T, Luo Y Q, Reichstein M, Smith M D, Smith S D, Bell J E, Fay P A, Heisler J L, Leavitt S W, Sherry R, Smith B, Weng E S. Consequences of more extreme precipitation regimes for terrestrial ecosystems. BioScience, 2008, 58(9): 811-821.
- [41] Du H B, Alexander L V, Donat M G, Lippmann T, Srivastava A, Salinger J, Kruger A, Choi G, He H S, Fujibe F, Rusticucci M, Nandintsetseg B, Manzanas R, Rehman S, Abbas F, Zhai P M, Yabi I, Stambaugh M C, Wang S Z, Batbold A, de Oliveira P T, Adrees M, Hou W, Zong S

- W, Santos e Silva C M, Lucio P S, Wu Z F. Precipitation from persistent extremes is increasing in most regions and globally. Geophysical Research Letters, 2019, 46(11): 6041-6049.
- [42] Liu W Z, Zhang X C, Dang T H, Ouyang Z, Li Z, Wang J, Wang R, Gao C Q. Soil water dynamics and deep soil recharge in a record wet year in the southern Loess Plateau of China. Agricultural Water Management, 2010, 97(8): 1133-1138.
- [43] Zheng W B, Wang S Q, Sprenger M, Liu B X, Cao J S. Response of soil water movement and groundwater recharge to extreme precipitation in a headwater catchment in the North China Plain. Journal of Hydrology, 2019, 576; 466-477.
- [44] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils. Water Resources Research, 1982, 18(5): 1311-1325.
- [45] Bai X, Jia X X, Zhao C L, Shao M A. Artificial forest conversion into grassland alleviates deep-soil desiccation in typical grass zone on China's Loess Plateau; regional modeling. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021, 320; 107608.
- [46] Ye M T, Zhao X N, Biswas A, Huo G P, Yang B, Zou Y F, Siddique K H M, Gao X D. Measurements and modeling of hydrological responses to summer pruning in dryland apple orchards. Journal of Hydrology, 2021, 594: 125651.
- [47] Nan W G, Ta F, Meng X Q, Dong Z B, Xiao N. Effects of age and density of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* on soil moisture in the semiarid Mu Us Dunefield, Northern China. Forest Ecology and Management, 2020, 473: 118313.
- [48] 费洪岩, 童倩, 万传宇, 潘若鹏, 韩凤朋. 黄土高原不同林龄刺槐林土壤水分亏缺程度. 水土保持学报, 2022, 36(5): 240-246.
- [49] 陶泽. 黄土塬区果园深层土壤水消耗特征及其对水平衡的影响. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [50] 刘丙霞, 任健, 邵明安, 贾小旭. 黄土高原北部人工灌草植被土壤干燥化过程研究. 生态学报, 2020, 40(11): 3795-3803.
- [51] Song X L, Gao X D, Wu P T, Zhao X N, Zhang W, Zou Y F, Siddique K H M. Drought responses of profile plant-available water and fine-root distributions in apple (*Malus pumila* Mill.) orchards in a loessial, semi-arid, hilly area of China. The Science of the Total Environment, 2020, 723; 137739.